

电磁波层析技术在工程地质中的应用

岳崇旺¹, 王祝文¹, 徐加益²

(1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 2. 贵州省水利水电勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 简要叙述了电磁波层析成像技术的基本原理、工作方法, 结合几个工程勘查实例, 以二维图像的形式比较直观、清晰地重现地下介质的构造形态, 为工程地质勘查、场地地基安全稳定性以及水坝的评价提供了重要的依据。

关键词: 电磁波 CT 成像; 工程地质; 二维图像

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2008)02-0216-04

电磁波透视 (EM) 法是一种传统的物探手段, 前苏联早在 1923 年便开始了研究, 并对无线电波透视法做了大量的研究^[1], 但直到 20 世纪 70 年代, 它的主要应用领域仍限高频测井工作上。20 世纪 80 年代以来, 随着地学层析技术的出现, EM 法增加了新的内容, 使高频电磁波同声波、地震波一样, 也作为一种透射波被引用到层析观测之中。美国首先重建出井间介质的吸收系数和速度分布的图像, 并进一步发展了 ART (代数重建法) 技术^[2]; 在我国, 吴以仁等对 EM 法做了系统性的总结^[3], 易永森还采用阴影法取得了许多工程物探的成果^[4]。由于它是对孔间介质进行全方位的扫描, 数据采集量大, 精度高, 因此钻孔电磁波 CT (computerized tomography) 技术在解决断层破碎带、软弱层、岩溶等地质构造方面有明显的优势。

1 基本原理

岩矿理论和实践表明, 吸收系数与介质的电阻率、磁导率、介电常数以及电导率的频率有关。由于不同介质对电磁波的吸收存在差异, 当电磁波穿越不同的地下介质 (各种不同的岩石、矿体等), 或者

层析介质中存在不均匀层或裂隙破碎等异常时, 其电阻率、介电常数、电导率、磁导率等均发生变化, 吸收系数就会呈现异常, 在电磁波层析成像中, 就形成类似“阴影”一样的表现形式, 可以利用这些差异来推断目标体位置、结构与形状, 这种方法与医学上的 CT 透视相似, 故又称井间 CT 技术 (EWCT) 或坑道透视法 (坑透法)。电磁波层析成像的过程和原理见图 1。

电磁波理论表明, 在射线光学近似下, 有耗介质中偶极天线发射与接收存在下述关系^[3]

$$E = E_0 \frac{e^{-\beta r}}{r} f(\theta) \sin\theta, \quad (1)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right]},$$

式中, E 为场强观测值; E_0 是一个与发射天线的条件和介质有关的初始场强; r 为发射点至接收点距离; $f(\theta) \sin\theta$ 为天线方向因子, 对于常用的半波天线, $f(\theta) = \cos[(\pi/2) \cos\theta] / \sin\theta$; β 为吸收系数 (实测为视吸收系数 β_s); ω 为天线圆频率; ϵ 为介电常数; μ 为磁导率; σ 为电导率。

由式(1)可得

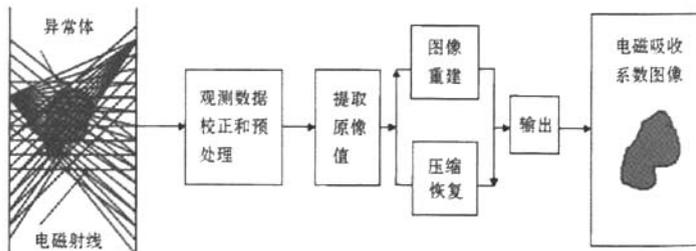


图 1 电磁波 CT 工作原理

$$\beta r = \ln \left[\frac{E_0}{E} \frac{1}{r} f(\theta) \sin \theta \right], \quad (2)$$

经离散化后得到线性方程组

$$\sum_{j=1}^n \beta_j x_j = y_i. \quad (3)$$

式(3)是第 i 条射线得到的方程,其中 β_j 是第 i 条直线穿过第 j 个网格的吸收系数; x_j 是线元, y_i 是观测值,它等于式(2)的右边。

所有射线可组成 1 个矩阵方程组

$$\mathbf{B}\mathbf{X} = \mathbf{Y}, \quad (4)$$

\mathbf{X} 为射线元组成的 $M \times N$ 维矩阵, \mathbf{B} 是电磁波吸收系数组成的 $N \times 1$ 维矩阵。电磁波层析技术便是通过解式(4)来反演 β 系数,从而确定地质体异常。

2 工程应用实例

钻孔电磁波层析 CT 技术与常规的物探方法不同之处在于是对井间电磁参数的全方位扫描,提取的数据量大,精度高,反演得到的色度图是对式(2)的直接反映,提取的地质信息丰富,因而它能够适用于各种工程地质探测。通过在几个地区做的电磁波 CT 成像测量实验,证明这个方法在不同的目标探测中有比较理想的效果。

2.1 在探测近地表破碎带中的应用

破碎带是一种常见的工程地质隐患,在地质勘查和工程选址中越来越受到重视。一般来说,破碎带具有以下特征:①岩性差,强度低;②岩石孔隙度大,含水量较高;③中间局部夹有硬层。因而,当电磁波穿过这类岩石时,吸收会明显加大,电磁波衰减加剧。据此,电磁波 CT 可以用来探测近地表破碎带。

贵阳市某拟建场地附近存在 2 个煤矿,为了查明场地钻孔 ZK5—ZK4 剖面煤系地层及采空区的存在、分布范围以及岩溶、隐伏断层等地质异常体的发育情况,为拟建场地的稳定性和场地建筑的适宜性评价提供依据,在钻探的基础上对场地进行了跨孔电磁波 CT 透视。测区属中、低山丘陵侵蚀地貌,地形起伏不大,地层由新到老有:第四系残坡积层,三叠系下统大冶组、沙堡湾组,二叠系上统大隆组、长兴组、龙潭组。该测区位于扬子准地台遵义断拱贵阳复杂构造变形区牛角坡背斜东翼近轴部,岩层呈单斜产出,岩层产状为 $75^\circ \sim 78^\circ$ 。测量的井间距为 32 m,孔深为 173 m,根据现场测试结果,确定采用电磁波频率为 16 MHz。测量结果经数据处理后得到的反演色度图见图 2。

根据图 2 所示并结合钻孔资料,可以知道,电磁

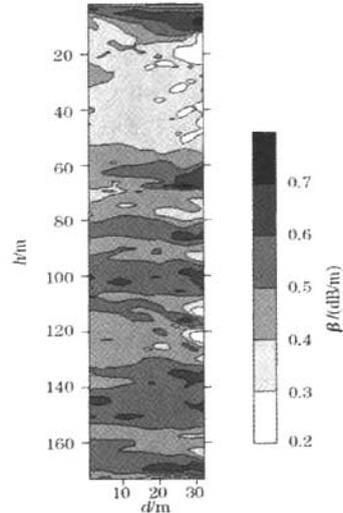


图 2 贵阳市某场地 CT 测量 β 反演结果

波吸收系数在 0 ~ 0.5 之间的岩体较完整,为背景值,该区 50 m 以上的岩体比较完整;电磁波吸收系数在 0.5 ~ 0.6 之间为岩体较破碎,0.6 以上为含泥、钙质较高的岩体或为煤系地层;该区从 50 m 以下,基本上就是属于这样的地层,从图中可以看出,这些破碎带基本上是成层状分布。

2.2 在水电工程防渗帷幕中的应用

在西南地区水电工程中,为减少建筑物地基渗漏量和扬压力,防止渗透水流在岩溶、裂隙发育岩体及断层破碎带内产生机械及化学管涌,一般采用防渗帷幕处理方案,因此在初步设计阶段需要充分了解渗漏条件。帷幕线上的溶蚀、构造带是防渗帷幕灌的重点。为了精确探测这些防渗重点存在的位置及规模,查明防渗帷幕线岩体完整性及岩溶破碎带、节理裂隙发育带等发育规模及分布情况,为防渗帷幕灌浆设计工作提供定量参数,需要在建设初期阶段引入物探工作。孔间电磁波 CT 由于其探测分辨率高,探测范围大,而又充分利用了先期的钻孔,为防渗帷幕优化了设计方案,收到了很好的效果。

贵州省铜仁市某水电站在建设初期阶段便引入了孔间电磁波 CT 的物探方法。我们知道,岩体裂隙发育程度与穿过的电磁波吸收强弱密切相关。岩体里的洞穴、断层破碎带、裂隙透水带等渗漏隐患和透水地层、相对隔水层的分布情况,都与电磁波吸收系数有关。完整性较差的岩体,电磁波在穿过程中发生多次散射,信号衰减较快,吸收系数越高,反之亦然。本次电磁波 CT 主要目的是查明节理裂隙发育带、岩溶破碎带的发育情况,根据实测资料,经现场试验,一般岩溶破碎带吸收系数 < 1.1 dB/m,

完整基岩吸收系数 $>0.7 \text{ dB/m}$, 节理裂隙发育带的吸收系数介于 $0.7 \sim 1.1 \text{ dB/m}$ 之间; 介质电磁参数差异明显, 从物性上满足用电磁波 CT 层析成像技术测试的地球物理前提。测试中分别采用了频率为 12 MHz 和 30 MHz 的天线。图 3 为该水电站的 WR220—WR211 剖面测量数据反演所得到的 β 反演色度图。图 3 中可以看见 1 处电磁波高吸收率异常, 其电磁波视吸收系数均在 0.7 dB/m 以上, 这说明电磁波在穿透该区域过程中急剧衰减, 结合 WR211、WR220 钻探分析, 推断该处异常带为节理

裂隙发育带或岩体破碎带, 局部形成溶隙、溶孔; 视吸收系数小于 0.7 dB/m 以下岩体完整性较好。通过图 3 还可看到, 频率越高, 其吸收系数越高, 分辨率越高, 电磁波衰减越快。由于 30 MHz 天线更能反映地质体内构造特征, 确定使用 30 MHz 天线较为合理。通过本次工作, 提供了区内存在的 26 个异常岩体破碎异常分布、位置及规模, 并根据异常分布及高程提供了灌浆帷幕底线, 这样节省了工作量, 缩短了工期, 大大节约了成本。

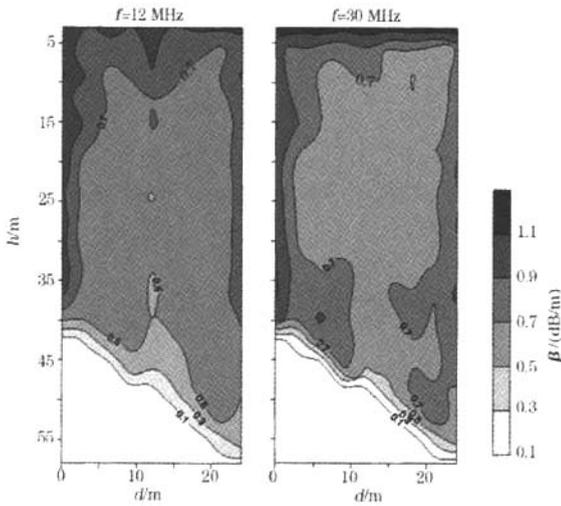


图3 贵州省某水电站剖面测量数据反演结果

2.3 在坝基勘察中的应用

在水坝建设初期, 查明坝基底部的地质构造是非常重要的。

吉林省白山市某水库拟建水坝, 由于下覆基岩为石灰岩, 坝基下可能存在溶洞, 为了找出隐患, 对该工程做了电磁波 CT 测试, 图 4 所示为该区 ZK6—ZK7 电磁波 CT 反演结果。由图可知, 在 $65 \sim 80 \text{ m}$ 存在一强吸收区, 吸收系数在 0.6 以上。根据 ZK6 的资料可知, 在深 $65 \sim 80 \text{ m}$ 距 ZK6 水平距离 $0 \sim 25 \text{ m}$ 范围内, 存在溶洞裂隙发育带。

3 几点认识

通过实例可以看到, 电磁波 CT 成像技术在工程领域可取得比较理想的效果。特别是在重大工程水利枢纽、大桥及高层、超高层建筑等项目进行地基勘探, 需要搞清地下持力层(坚硬土层或基岩)是否存在断裂构造问题时, 电磁波 CT 成像法更能显示出其独到之处^[7-12]。对于复杂地质条件, 如地下溶洞、地下不明隐蔽物、不同风化程度的基岩层、断裂

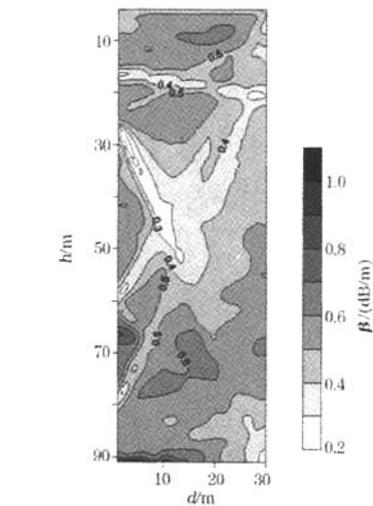


图4 吉林省某水库钻孔电磁波 CT 反演结果

或断层分布特征等, 电磁波 CT 成像技术除了能揭示常规勘探折射法可望推断的构造特征外, 还能进一步直观而精确地查明那些局部“异常病变体”的位置、形状与性质, 为工程设计提供更为详尽可靠的地质资料。

(1) 通过实例, 可以说明电磁波 CT 成像技术在岩土工程中的应用是成功的, 效果是令人满意的。它不仅能比较清楚地揭示出钻孔间的物性分布特征, 而且能提供较多的地下信息, 为工程设计提供较可靠的资料。

(2) 对地质情况复杂的场地及隐伏地基病害, 电磁波 CT 成像技术与传统的物探方法和钻探手段相比, 具有明显的快速、省钱的优越性。但若地表附近的岩性变化复杂, 特别是在软土地基中的淤泥层对电磁波有极强吸收作用的情况下, 因观测距离难以扩大, 使得电磁波 CT 成像技术在这些地区的应用有一定的局限性。

(3) 使用过程中, 需进行临场试验, 在兼顾频率和井间距的情况下, 选择合适的天线。由于缺失垂

直方向的投影数据,导致水平分辨率降低,在探测区域的上下两侧有可能出现虚假异常,因此,在进行电磁波 CT 图像的地质推断解释时,应综合判断才能得出正确结果。

(4)电磁波吸收系数为一相对值,它是由介质的物性和天线的圆频率所决定的。根据地质条件不同,探测目标异常体的不同,确定判别异常的吸收系数值也不同。

(5)在进行电磁波井间层析成像的试验观测工作中,应根据岩性的不同,注意井间距的长度,使孔深与剖面长度相互匹配,以保持良好的观测效果。在钻孔深度 < 100 m 的情况下,由于井斜和绞绳影响,测量的深度值误差会加大,因而有必要对深度进行分段校正。

电磁波 CT 成像与传统的物探方法相比,不仅更加形象、直观地反映出地层的精细构造,提取钻孔间更多的岩土内部的信息,在用于探测近地表破碎带、地下溶洞以及用于优化防渗帷幕设计方案当中效果明显,且采集数据量大,分辨率高,这有效地弥补了工程钻探的不足,在工程地质勘查当中有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 佩特罗夫斯基 A И. 地下无线电波法[M]. 北京:地质出版社, 1981.
- [2] Dines K A, Lytle R J. Computerized geophysical tomography[J]. Proc IEEE, 1979, 67(7): 1065.
- [3] 吴以仁,邢凤桐. 钻孔电磁波法[M]. 北京:地质出版社, 1982.
- [4] 易永森,周鹤鸣. 钻孔电磁波法在匈牙利铝土矿的初步应用[J]. 物探与化探, 1990, 14(6): 437.
- [5] 崔春林. 电磁波层析成像 CT 技术及其应用[J]. 山西水利科技, 2005, 155(1): 83.
- [6] 康国军,赵淑芬,房德斌. 钻孔电磁波透视井斜的影响及校正的方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(专辑): 84.
- [7] 欧阳立胜. 电磁波 CT 技术在探测堤坝工程中的应用[J]. 华南地震, 2002, 22(1): 64.
- [8] 付晖. 电磁波 CT 在水利水电工程岩溶探测中的应用[J]. 人民长江, 2003, 34(11): 26.
- [9] 宋文荣,吴仪芳,刘建达,等. 电磁波层析成像技术(CT)在地基勘探中的应用[J]. 地震学刊, 1994, 2: 62.
- [10] 李张明. 电磁波层析成像技术在溶洞探测中的应用[J]. 中国岩溶, 1995, 14(4): 372.
- [11] 邓争荣,熊永红,蔡加兴. 钻孔电磁波 C 丁在岩溶探测中的应用[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2004, 21(4): 32.
- [12] 郭贵安,魏柏林. 井间电磁波 CT 技术在溶洞探测中的应用[J]. 华南地震, 1999, 19(4): 28.

THE APPLICATION OF THE ELECTROMAGNETIC TOMOGRAPHY TECHNIQUE TO ENGINEERING GEOLOGY

YUE Chong-wang¹, WANG Zhu-wen¹, XU Jia-yi²

(1. Geoporation College of Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Investigation and Design Institute, Water Conservancy and Hydroelectric Engineering Bureau of Guizhou Province, Guiyang 550002, China)

Abstract: The electromagnetic tomography technique is a new widely-used geophysical method. It is highly accurate, rapid and economical. This paper describes in brief the primary theory and working procedure of electromagnetic tomography. Combined with several engineering examples, this paper illustrates the structural forms of underground media relatively intuitively and clearly by the form of 2D image. This result provides an important basis for the engineering geological survey as well as the evaluation of the safety and stability of site bases and dams.

Key words: electromagnetic tomography; engineering geology; investigation

作者简介: 岳崇旺(1981 -),男,吉林大学地球探测科学与技术学院在读博士,主要从事应用地球物理研究。